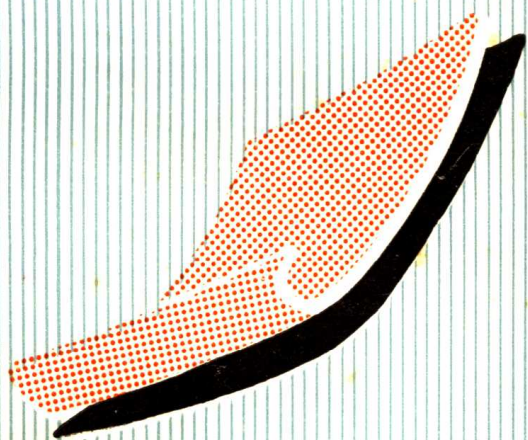


NAIHUO XIANWEI

耐火纤维



古练祥 等著

冶金工业出版社

X175.7
525

耐 火 纤 维

古练祥 等 著

冶金工业出版社

内 容 提 要

耐火纤维是一种新型的纤维状耐高温的保温材料，它具有传统的耐火砖和不定型耐火材料所不具备的特殊性能，目前，国外广泛用它作工业炉窑的内衬材料，我国也在推广应用，并在节能方面取得了显著的效果。

本书系统地叙述了各种耐火纤维的制造工艺、二次制品加工、使用及其性能的测试方法，同时对国外的有关情况也作了简要的介绍。

本书可供耐火纤维材料科研、生产、使用和能源管理技术人员参考，也可作为有关学校专业课程的参考材料。

耐 火 纤 维

古练祥 等 著

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/32 印张 4 字数 86 千字

1982年12月第一版 1982年12月第一次印刷

印数00,001~2,900册

统一书号：15062·3897 定价0.45元

序 言

耐火纤维材料是一种新型的纤维状耐高温的保温材料，它是继传统的耐火砖和不定型耐火材料以后的第三代耐火材料。

耐火纤维材料耐高温、容重轻、热稳定性及化学稳定性好、保温性能、介电及吸音性能也好，因而此种材料可广泛地用于各种工业部门。

国外从本世纪五十年代开始生产普通硅酸铝纤维，六十年代初，制造出各种形式的二次制品。此后又将其用作各种中低温工业窑炉的内衬材料。七十年代初发生能源危机以后，各国非常重视节能，因而耐火纤维材料得到了很大的发展。相继又发展了高纯硅酸铝纤维、高铝纤维、含铬硅酸铝纤维、多晶莫来石纤维、多晶氧化铝纤维及稳定化氧化锆纤维等耐高温纤维品种，形成了一个由低温到高温的耐火纤维系列。现在，各国耐火纤维制品的总年产量为五万吨左右。

耐火纤维材料作为一种工业材料的地位已经确定。英国、美国及苏联等国家，已经制订或正在制订部分耐火纤维制品质量的国家标准。

近十几年来，国外耐火纤维及其制品的生产工艺也有了很大改进，普遍采用先进的电阻炉熔融连续成纤工艺，代替了电弧炉熔融成纤工艺。二次制品加工，在干法连续成毯的基础上，又发展了针刺工艺。耐火纤维材料的使用施工技术也有了很大提高。

我国于七十年代初，开始以焦宝石为原料生产普通硅酸铝纤维。几年来，发展很快，总年产普通硅酸铝纤维及其制

品约数千吨，并能少量生产高纯硅酸铝纤维、高铝纤维及含铬硅酸铝纤维。已经完成或基本上完成多晶莫来石纤维、多晶氧化铝纤维及稳定化氧化锆纤维的试验室研究工作。并对普通硅酸铝纤维制品性能的测试方法进行了研究，即将制订部分耐火纤维制品质量的国家标准。目前，全国已有上千台工业窑炉采用耐火纤维材料内衬，均得到了较好的节能效果。

但是，我国耐火纤维及其制品的生产工艺还比较落后，基本上属于间歇式的生产工艺。产品质量也不稳定，而且品种少，成本也较高。

随着我国耐火纤维及其制品生产和使用的发展，已有越来越多的人重视这一新型的耐火材料。本书就各种耐火纤维的制造工艺以及耐火纤维制品的加工工艺、使用方法和性能测试方法等，进行比较系统的介绍，以利于改进耐火纤维及其制品的生产工艺，以促进耐火纤维材料的广泛推广使用。本书主要以现行生产工艺及科研结果为根据，因而对耐火纤维材料的科研、生产、使用及性能测试等，有一定的参考价值。

本书是在钟香崇和郑安忠二位高级工程师的支持和指导下编写的，在此对他们表示感谢。对所引用文献的作者们，在此也一并致以谢意。

参加本书编写工作的有：李贵勤（第一章）、金世敏（第二章）、古练祥（第三章）和权致相（第四章）。由于编者的水平有限，书中一定会有错误与不妥之处，望广大读者提出批评指正。

一九八一年九月

目 录

第一章 耐火纤维的制造	1
第一节 概述	1
第二节 各种耐火纤维的制造	2
一、原料熔融设备	3
二、纤维化方法	7
三、几种主要耐火纤维的制造	8
参考文献	26
第二章 耐火纤维制品	29
第一节 概述	29
第二节 耐火纤维制品的种类	30
一、散状纤维	30
二、纤维毡	31
三、纤维毡	32
四、湿纤维毡	33
五、纤维纸	34
六、纤维异形制品	35
七、编织制品	35
第三节 耐火纤维制品的制造工艺	41
一、耐火纤维毡(毡)的制造工艺	42
二、湿纤维毡的制造工艺	57
三、纤维纸的制造工艺	59
四、异形制品的制造工艺	66
参考文献	68
第三章 耐火纤维的用途和用法	70
第一节 作工业炉内衬材料	70
一、材质的选择	71
二、纤维护衬厚度的选择	71

三、施工方法	82
四、在工业炉上使用高温耐火纤维炉衬的节能和经济效果	96
第二节 隔热材料	99
一、用于钢锭加热炉水冷管的隔热	99
二、炉壁的填充隔热材料	100
三、铸造用冒口管	100
第三节 其它用途	101
一、密封材料	101
二、衬垫材料	101
三、吸音材料	102
四、过滤材料	102
五、触媒载体	102
六、原子反应堆内衬材料	102
参考文献	103
第四章 耐火纤维性能测定方法	104
第一节 容重的测定方法	104
一、测定原理	104
二、测试方法	104
第二节 渣球率测定方法	106
一、测试原理	107
二、测试方法	107
第三节 加热线收缩率的测定方法	108
一、测试方法	109
第四节 导热率的测定方法	111
一、量热器法导热仪的工作原理	112
二、装炉	112
三、测试	114
第五节 抗气流冲刷性能的测定	116
一、测试原理	116
二、装置	116
三、测试	117

第六节 高温回弹率的测定	117
一、测试原理	118
二、装置	118
三、测试	118
第七节 抗拉强度的测定方法	119
一、原理	119
二、装置	119
三、测试	119
第八节 含水率的测定方法	120
一、制样	120
二、烘干	120
三、称重	120
四、计算	120

第一章 耐火纤维的制造

第一节 概 述

耐火纤维也称作陶瓷纤维，它是一种新型柔软的纤维状耐高温的保温材料。可以用类似纺织及造纸等工业的生产工艺，将其加工成纸、绳、带、板、毯和毡等各种形式的二次制品。

耐火纤维制品可以用来代替耐火砖和不定型耐火材料，直接作为各种窑炉的内衬材料。其使用厚度可为普通轻质保温砖的 $1/2$ 左右，炉壁的重量为普通耐火砖的 $1/5 \sim 1/10$ 〔1〕。在同样的热负荷下，其蓄热量仅为普通保温砖的 $1/4$ 左右。因而可以大幅度地提高窑炉升温 and 冷却的速度，加快其运转周期〔2〕。由于耐火纤维制品的保温性能好，蓄热量小，用其作各种窑炉的内衬材料，可以节约燃料及电能达 $20 \sim 30\%$ 以上。

因为耐火纤维材料具有多种良好的性能，尤其是能大量地节省能源，它已经在冶金、机械、石油、化工、电子及轻工等各种工业领域中，得到了广泛的应用。此外，在宇航和原子能等尖端科学技术中，也得到了应用。

据称，1941年美国以高岭土为原料试制出耐火纤维，1942年，开始用空气喷吹法制造耐火纤维。1950年以后，美国金刚砂公司（The Carborundum Company）、巴布考克·维尔考克斯公司（The Babcock & Wilcox Company）和琼斯-曼维尔公司（Johns-Manville Corporation）等开始小规模生产高岭土纤维，并将其作为窑炉膨胀缝的填充材料。

六十年代初，制造出耐火纤维纸、绳、毯及真空成型品等二次制品。并开始将其作为高温衬垫材料、密封材料、过滤材料以及触媒载体等，从而确定了耐火纤维作为工业材料的地位。这一技术也相继传到欧洲、日本等国家和地区。

六十年代中期，开始将耐火纤维毯作为内衬材料，用在金属热处理窑炉、石油加热炉及陶瓷素烧窑上。从此，耐火纤维及其制品的品种也有了很大发展，陆续制造出高纯硅酸铝纤维、含铬硅酸铝纤维、高铝纤维、多晶莫来石纤维、多晶氧化铝纤维及多晶氧化锆纤维等。

七十年代以来，发展迅速的是氧化铝纤维。1972年，英国帝国化学工业公司(Imperial Chemical Industries Ltd.)研制成多晶氧化铝纤维，1974年进行半工业性生产。1979年底，建成一条年产500~700吨的工业生产线〔3,4〕。

我国于七十年代初，开始以焦宝石为原料试生产普通硅酸铝纤维。现在，全国有数十家生产厂，年产耐火纤维制品达数千吨。除普通硅酸铝纤维外，还可以小规模生产高纯硅酸铝纤维、含铬硅酸铝纤维及高铝纤维等。多晶莫来石纤维、多晶氧化铝纤维及多晶氧化锆纤维等耐高温纤维，也基本上研究成功。

目前，国内以生产普通硅酸铝纤维为主，其主要的二次制品有毡、纸、板、湿毡及砖等。几年来，我国在耐火纤维及其制品的科研、生产和使用方面，均取得了较大的进展。

第二节 各种耐火纤维的制造

目前比较普遍生产和使用的耐火纤维，按其结构形态可分为非结晶质和结晶质纤维两大类。其中，非晶质耐火纤维，是将原料在电弧炉或电阻炉中熔融，用压缩空气、高温

水蒸气或燃气等喷吹熔融液流股，或者用离心甩丝法工艺进行纤维化而制得的。结晶质纤维，是采用胶体法或有机纤维先驱体法等工艺制造的。

一、原料熔融设备

用熔融法制造耐火纤维时，首先要将原料熔融，并维持其熔融状态，还要使之形成具有合适粘度的稳定流股。目前，熔融原料用的电炉主要有两大类：电弧炉和电阻炉。

1. 电弧炉

(1) 单熔池电弧炉 用于制造耐火纤维的最简单的电弧炉，是以石墨为电极的功率较小的单相或三相电弧炉。在其炉体的侧下方或底部，设有熔融液流口。该种电弧炉的功率较小，往往不能形成连续稳定的熔融液流股，所制造的耐火纤维的质量也不稳定。而且在流口附近，熔融液易凝固，流股的位置也不稳定。目前，我国各耐火纤维厂基本上都采用这种电弧炉。

(2) 侧流式双熔池电弧炉^[5] 如图 1-1 所示，这种

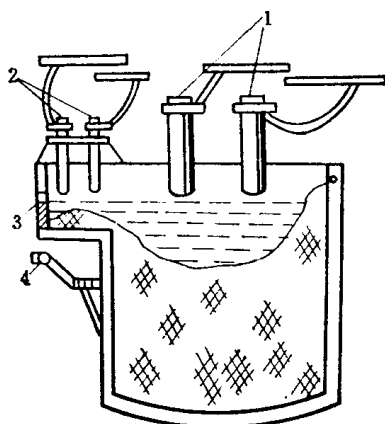


图 1-1 侧流式双熔池电弧炉

1—主电极；2—辅助电极；3—碳插板；4—喷嘴

电弧炉由主熔池和辅助熔池构成。其主熔池为三相供电（图中只表示出两个电极），辅助熔池一般为单相供电，石墨电极能够自动升降。原料在主熔池内熔融，然后流入辅助熔池。在辅助熔池中，依靠辅助电极供电，来保持熔融液的温度稳定和使之具有较好的流动性。还可以通过调整辅助电极的输入功率，来调节熔融液的温度，进而调节熔融液的粘度。

这种电弧炉具有水冷炉壳，使熔融原料自固炉衬。辅助熔池的前墙备有一个可拆装的碳插板，碳插板顶边中心处有一V形流口。熔融液依靠倾斜炉子或溢流，从此流口流出，形成流股，然后进行纤维化。

（3）底流式双熔池电弧炉〔6〕 这种电弧炉如图1-2所示，也是由一个主熔池和一个辅助熔池构成。主熔池为三相供电（图中只表示出两个电极），辅助熔池为单相供电。它与前述侧流式双熔池电弧炉的区别，就在于其熔融液的流口

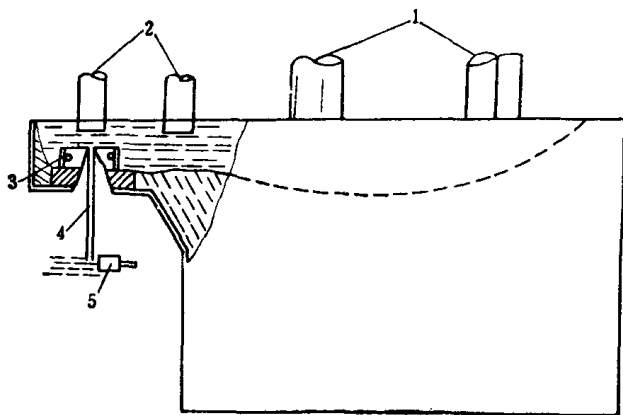


图 1-2 底流式双熔池电弧炉

1—主电极；2—辅助电极；3—金属流口；4—熔融液流股；
5—喷嘴

置于辅助熔池的底部，并且为水冷金属流口。由于水冷，金属流口的表面能够形成一层凝固的熔融材料的保护层。辅助熔池的一个加热电极，置于流口的上方。可以通过改变金属流口冷却水的流速与辅助电极输入的功率，来控制金属流口表面保护层厚度的大小，进而调整熔融液流股直径的大小。因此，如果辅助电极输入功率较小时，它距流口的水平距离就应小些。但距离太近时，熔融液流股不易保持稳定。这就应适当提高辅助电极的输入功率，使之距流口远些。

水冷金属流口，用中碳钢制造即可。当熔融液流股直径为3~6毫米时，则纤维化的效果较好。若考虑熔融料需凝成一定厚度的保护层，熔融液流口直径为10~16毫米时，可以得到较满意的结果。

熔融液流股从流口流出时，与金属流口接触的那部分孔的深度应尽量小些，这样可以减少流股凝固堵塞流口的机会。这个深度一般为流口直径的1/8左右较合适。

美国的一些主要耐火纤维公司，以前差不多均采用电弧炉来制造耐火纤维〔7〕。1973年，苏联波格丹诺维奇耐火材料厂开始用天然原料生产耐火纤维，所采用的电炉就是双熔池电弧炉。主熔池采用三根石墨电极，由三相变压器供电，额定功率为1000千伏安，电压为349伏，电流为1000~1800安。辅助熔池采用两根电极，额定功率为200千伏安，电压为500伏，电流为350~400安。主熔池的容量为400公斤左右熔融液，通过辅助熔池流口的熔融液流量约为4公斤/分〔8〕。采用这种电弧炉，可以实现连续熔融和连续成纤。

采用电弧炉熔融原料来制造耐火纤维，热量比较集中，受热区的温度对于电极输入功率变化的反应比较敏感，如输入功率稍有变化，受热区的温度则立即就会改变。此外，由

于电弧加热，石墨电极不浸入熔融液内，引进熔融液中的碳就少。如果熔融液中引进的碳量多，则会降低纤维的收得率和使纤维变脆。采用电弧炉不足的方面，是熔融液流股由于受电弧加热的影响，不易维持稳定，所制得的纤维渣球率较高，纤维收得率低，单位电耗高。工作时电弧噪音较大，原料飞散损失多，工作环境粉尘含量高。尤其是用粉料熔融时，原料损失更多，粉尘含量更高。

2. 电阻炉

这种炉子的特征是电极浸入熔融液中，同熔融原料直接接触。几乎电极间所有的电压降都是跨在电极间的熔融料上，依靠熔融料的电阻发热使原料熔融。

一般电阻炉是敞开式的，有水冷炉壳，自固炉衬，只有一个熔池，而无辅助熔池。可用三相供电，或三个单相供电。现用炉子的功率多为数百千瓦至一千千瓦左右。所用电极材料为钨或钼，电极多半设有水冷装置。熔融液流口材料，也多半采用钨或钼，有的有水冷结构，有的不用水冷。同时，金属流口用氮气等气体保护，以减少其氧化损失。如果采用单相供电，还可以将金属流口作为一个电极。通常在流口的上方备有一根可调塞杆，用来控制熔融液流股的大小。

采用电阻炉熔融原料，对电能的利用率比电弧炉高。用电阻炉熔融原料生产耐火纤维，每磅耐火纤维的电耗为0.8度，而用电弧炉时则为1.5度。用电阻炉代替电弧炉，可节约电耗50%〔9〕。此外，熔融液的流股稳定，纤维化效果好，纤维中的渣球率低，熔融原料的损失少，粉尘少，噪音也比电弧炉小。采用电阻炉制造耐火纤维，也可以实现连续熔融和连续成纤。

六十年代，美国有的耐火纤维公司采用电阻炉熔融蓝晶石制造蓝晶石纤维，但大多数公司还是采用电弧炉。从七十年代开始，美国大部分耐火纤维公司均采用了电阻炉。

二、纤维化方法

1. 喷吹法

用压缩空气或高温水蒸气等喷吹电弧炉或电阻炉流口中流出的熔融液流股，便能形成耐火纤维，这就是喷吹法工艺^[1,7,10]。这一工艺采用的时间较久，技术比较成熟，国外大部分耐火纤维公司都采用这种工艺。美国巴布考克·维尔考克斯公司采用压缩空气喷吹，所用空气的压力为7~8公斤/厘米²。苏联波格丹诺维奇耐火材料厂用170°C的水蒸气喷吹，水蒸气的压力为6.5~7.5公斤/厘米²^[8]。美国金刚砂公司也采用水蒸气喷吹。我国各耐火纤维厂，则采用压缩空气喷吹，空气压力为6公斤/厘米²左右。

采用喷吹法工艺时，压缩空气或水蒸气喷嘴的形式及出气孔直径的大小，对所制纤维的质量均有影响。我国一般采用出气孔为V形排列的喷嘴。

采用喷吹法工艺，所用的设备比较简单，制得的耐火纤维比较短而细。

2. 甩丝法

使熔融液流股落在高速回转离心辊的表面上，由于离心力的拉伸作用，使熔融液分散，经二级或三级离心便制得了纤维，这就是甩丝法工艺。该种工艺所用的装置如图1-3所示^[1,7,10]。

有一种三辊离心甩丝机，由布料辊和两级甩丝辊组成^[11]。三个辊的转速不同，布料辊的圆周速度为20.3~30.5米/秒，一级甩丝辊为71.2~106.8米/秒，二级甩丝辊

为86.4~132.2米/秒。不同品种的纤维，其熔融原料的性能也会有所不同。如果所生产的纤维品种改变时，根据具体情况，可在一定的范围内改变辊子的转速。

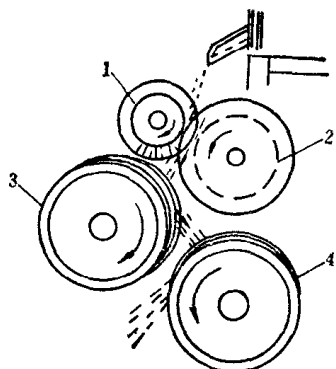


图 1-3 离心甩丝机
1—布料辊，2—一级甩丝辊，
3—二级甩丝辊，4—三级甩丝辊

这种甩丝机布料辊的直径为6~7.5英寸，甩丝辊的直径为布料辊直径的2~3倍。此外，对几个辊之间的布置和旋转方向等，都有一定的要求。

离心辊用硬质不锈钢制造，其内通水冷却。

美国金刚砂公司曾用过两级离心甩丝机，其甩丝辊的直径为12英寸，转数为4200转/分^[7]。

美国燃烧工程公司(Combustion Engineering, Inc.)用三辊离心甩丝机，第三辊的转数最高，达10000转/分。

甩丝法工艺所用的甩丝机，设备比较复杂，维修较麻烦，不锈钢离心辊需要经常更换，一般一、二周就要换一次。甩丝法工艺的纤维产量较大，需要有能力较大的电炉与之配合，才能形成连续的生产工艺。如果电炉的功率不足，则熔融原料的性能不易达到合适的程度，会影响纤维的质量。此外，收集纤维的方法也比喷吹法要复杂一些。

采用离心甩丝法工艺制造的纤维较长而粗，渣球含量较少。用这种工艺所生产的纤维，主要用来制造耐火纤维绳和布等织物。

三、几种主要耐火纤维的制造

1. 普通硅酸铝纤维

普通硅酸铝纤维，是以高岭土或耐火粘土等天然矿物的煅烧料为原料的，有的再加入少量的 B_2O_3 或 ZrO_2 等添加剂，在电弧炉或电阻炉中熔融，形成稳定的流股。用喷吹法或离心甩丝法工艺，使熔融液流股分散并纤维化，便制成普通硅酸铝纤维。

组成高岭土和耐火粘土的主要矿物是高岭石 ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)，其理论组成为 Al_2O_3 46.60%、 SiO_2 39.48%、 H_2O 13.92%。按其化学组成来说，高岭土和耐火粘土主要是由 Al_2O_3 与 SiO_2 组成的。煅烧后， Al_2O_3 与 SiO_2 的总含量为 92~97%，而 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 及其它氧化物的总量则为 3~8%。

我国主要采用煅烧的焦宝石耐火粘土原料，制造普通硅酸铝耐火纤维。

制得的普通硅酸铝纤维，可以进一步加工成各种形式的二次制品。

目前，国内外所产的普通硅酸铝纤维及纤维毡的主要理化性能，列于表1-1[12、13]。

2. 高纯硅酸铝纤维

(1) 硅酸铝纤维的再结晶化 熔融法制造的硅酸铝纤维，是采用气体喷吹或甩丝法工艺，使熔融液流股分散并急冷而成纤维的。由于熔融液急冷，使所形成的纤维成玻璃形态。但纤维被加热以后，尤其是在温度较高的情况下，硅酸铝纤维就会逐渐析出莫来石 ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) 及方石英 (SiO_2) 结晶。析出结晶后，纤维便逐渐失去其原有的透明度，纤维变脆，甚至粉化。硅酸铝纤维的这一再结晶化现象，称为“析晶”或“失透”。